不同热处理豆渣中碳水化合物分子结构与其营养价值及瘤胃降解特性的相关性研究

李　昕　徐宏建　霍鹏举　王玉洁　刘　鑫　么恩悦　孙满吉*　张永根*

（东北农业大学动物科学技术学院，哈尔滨 150030）

摘　要：本试验旨在探求不同热处理对豆渣碳水化合物分子结构的影响及其与营养价值、瘤胃降解特性的相关关系。本试验采用常规化学分析方法并结合康奈尔净碳水化合物-净蛋白质体系（CNCPS）和尼龙袋技术对不同热处理的豆渣进行营养价值评定，并利用傅里叶变换红外光谱技术（FTIR）分析豆渣碳水化合物分子结构的变化，进而探求它们之间的相关关系。结果表明：1）热处理使豆渣的营养价值和中性洗涤纤维（NDF）瘤胃降解率降低。2）不同热处理对豆渣碳水化合物分子结构中结构性碳水化合物（STCHO）、纤维复合物（CELC）、总碳水化合物（CHO）的峰面积以及 3 个峰面积中相应的峰高均有显著影响（$P<0.05$）。3）STCHO 与 CHO 的峰面积比，以及总碳水化合物中的峰高比可以有效地估测不同热处理豆渣的营养价值和 NDF 瘤胃降解参数的含量。综上所述，不同热处理对豆渣碳水化合物分子结构、营养价值和 NDF 瘤胃降解率均有影响，不同热处理豆渣中碳水化合物分子结构与其营养价值、NDF 瘤胃降解特性之间存在相关关系，初步证明利用 FTIR 光谱技术得到的豆渣光谱信息能直接反映其热损害程度。

关键词：热处理；豆渣；FTIR；碳水化合物分子结构；相关关系

中图分类号：　　　　　　文献标志码：　　　　　　文章编号：

豆渣是加工豆腐、豆油等豆制品的副产物。研究表明，豆渣中含有膳食纤维、碳水化合物（CHO）、蛋白质等丰富的营养物质[1]。豆渣属于非常规饲料，非常规饲料的开发和利用

收稿日期：2018-04-13
基金项目：国家奶牛产业技术体系（CARS-36）
作者简介：李　昕（1994-），女，黑龙江肇东人，硕士研究生，从事反刍动物营养与饲料科学研究。E-mail: 2628613222@qq.com
*通信作者：孙满吉，教授，硕士生导师，E-mail: 302564115@qq.com；张永根，教授，博士生导师，E-mail: zhangyonggen@sina.com

能够有效降低奶牛饲养成本，对提高我国奶业竞争力具有重要意义。李岩等[2]利用康奈尔净碳水化合物–净蛋白质体系（CNCPS）和体外产气法对 4 个地区豆渣的营养价值进行评定得出，豆渣为反刍动物提供的可利用能值高，有利于微生物蛋白质合成。张学燕等[3]通过 CNCPS 和体外发酵参数指标的评定得出，豆渣的饲用营养价值要优于菜籽粕。但由于豆渣含水量高达 80%以上，在运输和储存的过程中极易腐败变质，不仅污染环境而且造成极大的资源浪费[4-5]。为了解决饲料运输和储存问题，生产上会采用脱水或者干燥等方式来降低饲料的含水量[6]。适宜的热处理既可以降低豆渣的含水量从而便于运输和储存，又不影响其营养价值，但过热处理会发生美拉德反应导致豆渣的营养价值降低[7]。用传统的化学方法对热处理后豆渣进行营养价值测定既费时又费力，因此，寻求一种能够直接地反映出豆渣营养价值热损害程度的敏感指标显得尤为重要。

傅里叶变换红外光谱技术（FTIR）能够快速、直接地揭示饲料内部的分子结构，并且对饲料内部的分子结构不具有破坏性[8]。碳水化合物光谱区域主要是由碳水化合物中 C-O 伸缩振动引起的[9]。总碳水化合物的特征区域主要位于 1 180～800 cm^{-1}，结构性碳水化合物的特征区域主要位于 1 486～1 188 cm^{-1}，可以为我们提供饲料的分子结构信息，而且它们的变化会影响饲料的营养价值和利用率[10-11]。Xin 等[8]通过 FTIR 得出玉米秸秆不同部位碳水化合物分子结构与其营养价值、瘤胃降解特性之间存在相关关系，并构建回归方程。Ji 等[12]通过表观衰减全反射傅里叶变换红外光谱技术（ATR-FTIR）得出了苜蓿干草和紫花苜蓿干草的碳水化合物分子结构与其营养价值、瘤胃降解特性之间存在相关关系。本试验旨在探究不同程度的热处理对豆渣营养价值、中性洗涤纤维（NDF）瘤胃有效降解率（ED）的影响，同时利用 FTIR 对不同热处理的豆渣进行扫描，探求不同热处理对豆渣中碳水化合物分子结构的影响及其与营养价值、NDF 瘤胃降解特性之间的相关关系，以期将得到的光谱信息作为热处理中一个敏感指标能够简单、快速、无破坏性的分析豆渣的热损害程度。

1 材料与方法

1.1 试验样品采集与处理

本试验于 2017 年 5 月在哈尔滨某饲料加工厂采集新鲜湿豆渣，测定其含水量为 80%，并将采集到的新鲜豆渣进行不同温度（100、115、130 ℃）和不同时间（2、4、6 h）的热处理。热处理方法为将新鲜豆渣平铺于滤纸上（厚约 1 cm），放入烘箱中，期间每 0.5 h 翻搅 1 次[13-14]。取出样品冷却后，部分样品用粉碎机粉碎过 1 mm 孔筛，用于常规化学成分分析；再取部分样品粉碎过 2 mm 孔筛，用于瘤胃降解试验；剩余样品粉碎过 0.25 mm 孔筛，用于光谱分析。

1.2 试验动物与饲粮

试验动物选用东北农业大学阿城实验基地的 3 头装有永久性瘤胃瘘管的健康荷斯坦奶牛（体重 600 kg 左右）进行瘤胃降解试验。试验期间每日饲喂 2 次（08:00 和 16:00），自由饮水。试验动物营养需要量参照奶牛营养需要 NRC（2001）[15]标准进行配制，基础饲粮组成及营养水平见表 1。

表 1 基础饲粮组成及营养水平（风干基础）

Table 1 Composition and nutrient levels of the basal diet (air-dry basis) %

项目 Items	含量 Content
原料 Ingredients	
羊草 Chinese wildrye	42.85
玉米青贮 Corn silage	15.82
玉米 Corn	13.18
麦麸 Wheat bran	3.74
糖蜜 Molasses beet	0.99
豆粕 Soybean meal	3.15
干酒糟 Dried distillers grain	5.35

棉籽粕 Cottonseed meal	2.06
玉米纤维饲料 Corn fiber feed	7.42
玉米胚芽粕 Corn germ meal	4.94
预混料 Premix1)	0.50
合计 Total	100.00
营养水平 Nutrient levels	
泌乳净能 NE_L/(MJ/kg)2)	5.44
粗蛋白质 CP	14.40
中性洗涤纤维 NDF	49.20
酸性洗涤纤维 ADF	30.60
钙 Ca	0.60
磷 P	0.40

1)每千克预混料中含有 Contained the following per kg of the premix：VA 8 000 000 IU，VD 700 000 IU，VE 10 000 IU，Fe 1 600 mg，Cu 1 500 mg，Zn 10 000 mg，Mn 3 500 mg，Se 80 mg，I 120 mg，Co 50 mg。

2)泌乳净能为计算值，其余为实测值。NE_L was a calculated value, while other nutrient levels were measured values.

1.3 测定指标及方法

1.3.1 常规化学成分分析

干物质（DM）、粗灰分（Ash）和粗脂肪（EE）的含量根据《饲料分析及饲料质量检测技术》[16]的方法进行测定。粗蛋白质（CP）含量采用 FOSS 8 400 全自动凯氏定氮仪进行测定。淀粉（starch）含量按照张旭等[17]的方法进行测定。NDF、酸性洗涤纤维（ADF）和酸性洗涤木质素（ADL）含量按照 Van Soest 等[18]的方法进行测定。根据 NRC（2001）[15]

公式求出总碳水化合物、非纤维性碳水化合物（NFC）、半纤维素（hemicellulose）和纤维素（cellulose）的含量。利用 CNCPS[19]公式求出碳水化合物中快速降解碳水化合物（CA）、中速降解碳水化合物（CB_1）、慢速降解碳水化合物（CB_2）、不可利用细胞壁成分（CC）的含量。

1.3.2　瘤胃尼龙袋法

参照 Peng 等[20]的方法，准确称取 7 g 样品装入已称重的尼龙袋内（规格 10 cm×20 cm，孔径 40 μm），然后用橡皮筋扎紧袋口。试验选用 3 头装有永久性瘤胃瘘管的健康荷斯坦奶牛。将称好的尼龙袋随机放入规格为 45 cm×45 cm 的瘤胃网兜中，并用 90 cm 长的绳子固定在瘤胃瘘管上，分别培养 0、2、4、8、12、16、24、36、48 h，每个时间点同一瘘管牛的尼龙袋个数均是 3 个。将取出后的尼龙袋，与 0 h 时间点一起用冷自来水冲洗，至水澄清为止，65 ℃烘干 48 h 至恒重，并记录残渣与尼龙袋的总重，然后粉碎过 1 mm 孔筛，保存于封口袋中待测。

1.3.3　光谱数据的采集及分析

在红外烤灯照射下，以溴化钾作为背景，将 2 mg 干燥的样品与 200 mg 溴化钾混合于玛瑙研钵中，充分研磨混匀后，用红外专用压片机（型号：769YP-15A 粉末压片机）压成半透明薄片。然后利用傅里叶变换红外光谱仪（型号：岛津 FTIR-8400S）对样品进行扫描，扫描波段在 4 000～400 cm^{-1}，分辨率为 4 cm^{-1}，扫描次数为 128，每个样品做 5 个重复，收集不同热处理豆渣的碳水化合物分子结构光谱图。

1.4　数据分析与计算

1.4.1　瘤胃降解特性相关参数的计算

某成分瘤胃消失率（%）=100×（某成分质量－残留物中某成分质量）/某成分质量。

根据Ørskov 等[21]提出的瘤胃动力学数学指数模型进行计算：

$Y=a+b(1-e^{-ct})$。

式中：Y 为尼龙袋在瘤胃中滞留 t 时间后营养成分的瘤胃消失率（%）；a 为快速降解部（%）；b 为慢速降解部分（%）；c 为慢速降解部分的降解速率（%/h）；t 为瘤胃滞留时间（h）。下式同。

饲料有效降解率的计算公式为：

有效降解率（%）$=a+[(b\times c)/(c+\mathrm{k})]$。

式中：a 为快速降解部（%）；b 为慢速降解部分（%）；c 为慢速降解部分的降解速率（%/h）；k 为瘤胃外流速率，为 0.046/h[22]。

1.4.2　中红外光谱分析

利用 OMNIC 8.2 软件对扫描后的样品红外光谱图进行处理和分析。先在 OMNIC 8.2 软件中找出碳水化合物基线位置，确定出结构性碳水化合物区域（基线：ca.1 475～1 187 cm^{-1}）、纤维复合物区域（基线：ca.1 287～1 187 cm^{-1}）、总碳水化合物区域（基线：ca.1 187～898 cm^{-1}），然后利用傅里叶自去卷积（FSD）确定位于总碳水化合物中 3 个峰高位置（峰位依次是 1 155、1 109、1 046 cm^{-1}），然后记录他们的峰高和峰面积并进行统计分析。

1.4.3　数据统计与分析

试验数据利用 Excel 2010 进行初步处理。然后，采用 SAS 9.4 软件中的 PROC MIXED 程序对不同热处理豆渣的碳水化合物成分、瘤胃降解参数以及光谱数值进行数据分析。具体模型为：

$Y_{ijk}=u+F_i+B_j+F_i\times B_j+e_{ijk}$。

式中：Y_{ijk} 是对自变量 ijk 的因变量；u 是变量的平均值；F_i 是温度效应（i=3；100、115、130 ℃）；B_j 是时间效应（j=3；2、4、6 h）；温度与时间的交互作用 $F_i\times B_j$ 作为固定效应；e_{ijk} 是误差效应。

Tuley-Karmaer 检验用于比较不同温度和时间之间的差异，$P\leq0.05$ 差异显著；$P>0.05$ 表示差异不显著。再利用 SAS 中的 PROC CORR 对它们进行相关性分析（$P<0.01$ 表示极显著

相关，$P \leq 0.05$ 表示显著相关，$0.05 < P < 0.10$ 表示趋于相关）。最后，碳水化合物的分子结构与其营养价值和瘤胃降解特性之间的预测模型通过 SAS 9.4 中的 PROC REG 程序逐步回归。

2 结 果

2.1 不同热处理对豆渣的碳水化合物成分和 CNCPS 碳水化合物组分的影响

由表 2 可知，不同温度和时间对豆渣的碳水化合物成分和 CNCPS 碳水化合物组分均有显著影响（$P < 0.05$），并且 2 个因素之间存在显著的互作效应（$P \leq 0.05$）。在碳水化合物成分中，随着温度的升高以及加热时间的延长，豆渣的 NDF、ADF、ADL、半纤维素和纤维素含量增加，130 ℃、6 h 组最高，100 ℃、2 h 组最低。随着温度的升高以及加热时间的延长，豆渣的 NFC 含量减少，碳水化合物含量变化不明显。而在 CNCPS 碳水化合物组分中，豆渣的 CA 含量随着温度的升高以及加热时间的延长而减少，130 ℃、6 h 组最低，100 ℃、2 h 组最高；豆渣的 CB_2 和 CC 含量却随着温度的升高以及加热时间的延长而增加，130 ℃、6 h 组最高，100 ℃、2 h 组最低。

表 2　不同热处理对豆渣碳水化合物成分和 CNCPS 碳水化合物组分的影响

Table 2　Effects of different heat treated on carbohydrates content and CNCPS carbohydrate composition in okara

项目 Items	100 ℃			115 ℃			130 ℃			SEM	*P* 值 *P*-value		
	2 h	4 h	6 h	2 h	4 h	6 h	2 h	4 h	6 h		温度 Temperature	时间 Time	温度×时间 Temperature ×time
碳水化合物成分 Carbohydrates content/%DM													
碳水化合物 CHO	69.44	69.14	68.50	68.73	69.19	68.84	68.89	68.52	68.69	0.120	0.01	<0.01	<0.01
淀粉 Starch	0.02	0.02	0.01	0.02	0.01	0.01	0.02	0.01	0.01	0.002	0.01	<0.01	0.05
中性洗涤纤维 NDF	42.39	43.66	46.19	43.74	46.54	47.73	47.66	49.55	50.85	0.138	<0.01	<0.01	<0.01
酸性洗涤纤维 ADF	25.17	26.14	28.13	26.00	28.20	29.17	28.75	29.86	30.74	0.137	<0.01	<0.01	<0.01

酸性洗涤木质素 ADL	1.12	1.57	1.76	1.63	1.77	1.96	1.80	2.24	2.44	0.056	<0.01	<0.01	0.03
半纤维素 Hemicellose	17.21	17.52	18.06	17.73	18.34	18.56	18.91	19.69	20.11	0.070	<0.01	<0.01	0.01
纤维素 Cellulosic	24.06	24.57	26.37	24.36	26.43	27.22	26.95	27.62	28.30	0.136	<0.01	<0.01	<0.01
非纤维性碳水化合物 NFC	33.26	31.80	29.59	31.38	30.49	29.42	30.23	28.11	27.04	0.228	<0.01	<0.01	0.01
CNCPS 碳水化合物组分 CNCPS carbohydrate composition/（%/CHO）													
快速降解碳水化合物 CA	47.87	45.96	43.17	45.63	44.05	42.71	43.84	41.00	39.34	0.293	<0.01	<0.01	0.02
中速降解碳水化合物 CB$_1$	0.03	0.03	0.02	0.03	0.02	0.02	0.03	0.02	0.02	0.002	0.01	<0.01	0.05
慢速降解碳水化	48.23	48.57	50.65	48.63	49.79	50.44	49.85	51.13	52.10	0.206	<0.01	<0.01	0.02

合物 CB_2													
不可利用细胞壁成分 CC	3.87	5.44	6.16	5.71	6.13	6.83	6.27	7.86	8.54	0.201	<0.01	<0.01	0.02

2.2　不同热处理对豆渣 NDF 瘤胃动态降解参数的影响

由表 3 可知，不同温度和时间对豆渣的 NDF 的快速降解部分（NDF_a）含量有显著影响（P<0.05），并且 2 个因素之间存在显著的互作效应（P<0.05）。但是，不同温度和时间对豆渣的 NDF 的慢速降解部分（NDF_b）、NDF 的慢速降解部分的降解速率（NDF_c）和 NDF 的有效降解率（NDF_{ED}）含量不存在互作效应（P>0.05），其中只有温度对豆渣的 NDF_b 和 NDF_{ED} 含量有显著影响（P<0.05）。豆渣的 NDF_a 和 NDF_{ED} 含量随着温度的升高而减少，其中 100 ℃、2 h 组最高；豆渣的 NDF_b 含量随着温度的升高而增加，其中 100 ℃、2 h 组最低。

表 3　不同热处理对豆渣 NDF 瘤胃动态降解参数的影响

Table 3　Effects of different heat treated on rumen degradation kinetics parameters of NDF in okara

项目 Items	100 ℃			115 ℃			130 ℃			SEM	P 值 P-value		
	2 h	4 h	6 h	2 h	4 h	6 h	2 h	4 h	6 h		温度 Temperature	时间 Time	温度×时间 Temperature×time
NDF 瘤胃降解参数 Ruminal degradation parameters of NDF													
NDF$_a$/%	5.97	5.50	4.13	5.25	4.89	3.34	4.65	2.76	2.30	0.145	<0.01	<0.01	<0.01
NDF$_b$/%	87.79	89.34	90.19	88.74	90.30	90.43	89.43	90.86	91.11	0.199	<0.01	<0.01	0.29
NDF$_d$/%	93.76	94.84	94.32	93.98	95.19	93.77	94.08	93.62	93.40	0.260	0.01	<0.01	0.02
NDF$_c$/(%/h)	3.20	3.03	2.96	3.08	2.91	2.88	3.09	3.06	2.86	0.055	0.09	<0.01	0.56
NDF$_{ED}$/%	40.20	39.21	37.67	39.09	38.13	36.39	38.79	37.21	35.43	0.472	<0.01	<0.01	0.91

NDF$_a$：中性洗涤纤维的快速降解部分；NDF$_b$：中性洗涤纤维的慢速降解部分；NDF$_d$：中性洗涤纤维的潜在可降解部分；NDF$_c$：中性洗涤纤维的慢

速降解部分的降解速率；NDF_{ED}：中性洗涤纤维的有效降解率。表 5 和表 6 同。

NDF_a: rapid degradable fraction of neutral detergent fiber; NDF_b: slowly degradable fraction of neutral detergent fiber; NDF_d: potentially degradable fraction of neutral detergent fiber; NDF_c: degradation rate of the slowly degradable fraction of neutral detergent fiber; NDF_{ED}: effective degradability o of neutral detergent fiber. The same as Table 5 and Table 6.

2.3 不同热处理对豆渣碳水化合物分子结构的影响

由表 4 可知，不同温度对豆渣的碳水化合物分子结构中结构性碳水化合物峰面积（A_STCHO）、纤维复合物峰面积（A_CELC）、总碳水化合物峰面积（A_CHO）以及 3 个峰面积中相应的峰高[总碳水化合物中 1155 峰高(H_1155)、总碳水化合物中 1109 峰高(H_1109)、总碳水化合物中 1046 峰高(H_1046)]均有显著影响（P<0.05），并且 2 个因素之间存在显著的互作效应（P<0.05）。2 个因素之间对峰面积比值[结构性碳水化合物与总碳水化合物峰面积的比值（A_STCHO/A_CHO）、纤维复合物与总碳水化合物峰面积的比值（A_CELC/A_CHO）、纤维复合物与结构性碳水化合物峰面积的比值（A_CELC/A_STCHO）]和峰高比值[总碳水化合物中 1155 峰高与 1109 峰高的比值（H_1155/H_1109）、总碳水化合物中 1155 峰高与 1046 峰高的比值（H_1155/H_1046）、总碳水化合物中 1109 峰高与 1046 峰高的比值（H_1109/H_1046）]不存在互作效应（P>0.05），温度对 A_CELC/A_STCHO 以及总碳水化合物中 H_1155/H_1109、H_1155/H_1046、H_1109/H_1046 有显著影响（P<0.05）。随着温度的升高，A_STCHO、A_CELC、A_CHO 逐渐减小，总碳水化合物的 3 个峰高也呈降低趋势。其中，100 ℃、2 h 组豆渣的 A_STCHO、A_CELC、A_CHO 最大，总碳水化合物中的 3 个峰高最高。

表 4　不同热处理对豆渣碳水化合物分子结构的影响

Table 4　Effects of different heat treated on carbohydrates molecular structure in okara

项目 Items	100 ℃			115 ℃			130 ℃			SEM	*P* 值 *P*-value		
	2 h	4 h	6 h	2 h	4 h	6 h	2 h	4 h	6 h		温度 Temperature	时间 Time	温度×时间 Temperature ×time
碳水化合物的峰面积 Carbohydrate peak area													
A_STCHO	14.02	12.62	11.68	13.02	10.79	9.27	5.11	10.23	10.13	0.954	<0.01	0.56	<0.01
A_CELC	2.74	2.48	2.33	2.55	2.12	1.89	1.08	2.14	2.06	0.191	<0.01	0.58	<0.01
A_CHO	37.19	33.92	32.89	34.81	29.23	26.02	13.92	27.99	28.35	2.595	<0.01	0.70	<0.01
总碳水化合物光谱中 3 个特征峰峰高 Peak height of 3 characteristic peaks in total carbohydrate spectrum													
H_1155	0.12	0.11	0.10	0.11	0.10	0.08	0.04	0.08	0.08	0.008	<0.01	0.48	<0.01
H_1109	0.16	0.14	0.13	0.15	0.12	0.11	0.05	0.11	0.11	0.011	<0.01	0.71	<0.01

H_1046	0.23	0.21	0.21	0.22	0.18	0.17	0.10	0.19	0.19	0.017	<0.01	0.74	<0.01
碳水化合物光谱结构比值 Ratio of carbohydrate spectral structure													
A_STCHO/A_CHO	0.38	0.37	0.36	0.37	0.37	0.36	0.37	0.37	0.36	0.004	0.28	<0.01	0.49
A_CELC/ A_CHO	0.07	0.07	0.07	0.07	0.07	0.07	0.08	0.08	0.07	0.002	0.17	0.27	0.92
A_CELC/A_STCHO	0.20	0.20	0.20	0.20	0.20	0.20	0.21	0.21	0.20	0.004	0.04	0.82	0.48
H_1155/H_1109	0.79	0.80	0.78	0.76	0.81	0.77	0.77	0.75	0.74	0.014	0.02	0.25	0.24
H_1155/H_1046	0.52	0.54	0.49	0.51	0.56	0.49	0.45	0.44	0.43	0.023	<0.01	0.08	0.60
H_1109/H_1046	0.67	0.68	0.63	0.68	0.70	0.63	0.58	0.58	0.58	0.023	<0.01	0.12	0.80

A_STCHO：结构性碳水化合物峰面积；A_CELC：纤维复合物峰面积；A_CHO：总碳水化合物峰面积。A_STCHO/A_CHO：结构性碳水化合物与总碳水化合物峰面积的比值；A_CELC/A_CHO：纤维复合物与总碳水化合物峰面积的比值；A_CELC/A_STCHO：纤维复合物与结构性碳水化合物峰面积的比值；H_1155：总碳水化合物中 1155 峰高；H_1109：总碳水化合物中 1109 峰高；H_1046：总碳水化合物中 1046 峰高；H_1155/H_1109：总碳水化合物中 1155 峰高与 1109 峰高的比值；H_1155/H_1046：总碳水化合物中 1155 峰高与 1046 峰高的比值；H_1109/H_1046：总碳水化合物中 1109 峰高与 1046 峰高的比值。表 5 和表 6 同。

A_STCHO: structural carbohydrate peak area; A_CELC: cellulosic compounds peak area; A_CHO: total carbohydrate peak area. A_STCHO/A_CHO: peak area ratio of structural carbohydrate to total carbohydrate; A_CELC/A_CHO: peak area ratio of cellulosic compounds to total carbohydrate; A_CELC/A_STCHO: peak area ratio of cellulosic compounds to structural CHO; H_1155: total carbohydrate peak height 1155；H_1109：total carbohydrate peak height 1109；H_1046：total carbohydrate peak height 1046; H_1155/H_1109: ratio of total carbohydrate peak height 1155 to peak height 1109; H_1155/H_1046: ratio of total carbohydrate peak height 1155 to peak height 1046; H_1109/H_1046: ratio of total carbohydrate peak height 1109 to peak height 1046. The same as Table 5 and Table 6.

2.4　不同热处理豆渣的碳水化合物分子结构与其营养价值和NDF瘤胃降解特性之间的相关关系

由表5可知，不同热处理豆渣的碳水化合物分子结构光谱参数与其营养价值之间存在一定的相关关系。其中，碳水化合物与A_STCHO/A_CHO存在极显著正相关（r=0.62，P<0.01）。NFC与A_STCHO/A_CHO以及总碳水化合物中的H_1155/H_1046、H_1109/H_1046存在极显著正相关（r=0.56～0.67，P<0.01）。NDF、ADF与A_STCHO、A_CELC、A_CHO、A_STCHO/A_CHO以及总碳水化合物中的H_1155/H_1046，H_1109/H_1046存在极显著负相关（r=-0.50～-0.63，P<0.01）。ADL与A_STCHO/A_CHO以及总碳水化合物中的H_1155/H_1046、H_1109/H_1046存在极显著负相关（r=-0.51～-0.58，P<0.01）。半纤维素与A_STCHO、A_STCHO/A_CHO以及总碳水化合物中的H_1155/H_1109、H_1155/H_1046，H_1109/H_1046存在极显著负相关（r=-0.50～-0.64，P<0.01）。纤维素与A_STCHO、A_CELC、A_CHO、A_STCHO/A_CHO以及总碳水化合物中的H_1155/H_1046、H_1109/H_1046存在极显著负相关（r=-0.54～-0.63，P<0.01）。

在CNCPS碳水化合物组分中，CA、CB_1与A_STCHO/A_CHO以及总碳水化合物中的H_1155/H_1046、H_1109/H_1046存在极显著正相关（r=0.54～0.65，P<0.01）。CB_2、CC与A_STCHO/A_CHO以及总碳水化合物中的H_1155/H_1046、H_1109/H_1046存在极显著负相关（r=-0.51～-0.69，P<0.01）。

在NDF瘤胃降解参数中，NDF_a与A_STCHO/A_CHO以及总碳水化合物中的H_1155/H_1046、H_1109/H_1046存在极显著正相关（r=0.59～0.62，P<0.01）。NDF_b与A_STCHO/A_CHO存在极显著负相关（r=-0.65，P<0.01）。NDF_d与总碳水化合物中的H_1155/H_1109、H_1155/H_1046，H_1109/H_1046存在显著正相关（r=0.43～0.50，P<0.05）。NDF_c、NDF_{ED}与A_STCHO/A_CHO存在极显著正相关（r=0.55～0.64，P<0.01）。

表 5　不同热处理豆渣的碳水化合物分子结构与其营养价值和 NDF 瘤胃降解特性之间的相关关系

Table 5　Relationship between molecular structure of carbohydrates, nutritional value and ruminal degradation characteristics of NDF in different heat treated okara

项目 Items	A_STCHO		A_CELC		A_CHO		A_STCHO/A_CHO		A_CELC/A_CHO		A_CELC/A_STCHO		H_1155/H_1109		H_1155/H_1046		H_1109/H_1046	
	r	*P*	*r*	*P*	*r*	*P*	*r*	*P*	*r*	*P*	*r*	*P*	*r*	*P*	*r*	*P*	*r*	*P*
碳水化合物成分 Carbohydrates content/%DM																		
淀粉 Starch	0.21	0.30	0.15	0.44	0.14	0.47	0.61	<0.01	-0.05	0.79	-0.42	0.03	0.44	0.02	0.56	<0.01	0.54	<0.01
中性洗涤纤维 NDF	-0.55	<0.01	-0.50	<0.01	-0.50	<0.01	-0.61	<0.01	0.11	0.58	0.47	0.01	-0.43	0.02	-0.61	<0.01	-0.61	<0.01
酸性洗涤纤维 ADF	-0.57	<0.01	-0.52	<0.01	-0.51	<0.01	-0.63	<0.01	0.11	0.58	0.49	0.01	-0.39	0.04	-0.60	<0.01	-0.62	<0.01
酸性洗涤木质素 ADL	-0.43	0.03	-0.39	0.05	-0.38	0.05	-0.58	<0.01	0.04	0.83	0.39	0.05	-0.41	0.04	-0.52	<0.01	-0.51	<0.01
碳水化合物 CHO	0.29	0.14	0.26	0.19	0.24	0.23	0.62	<0.01	0.13	0.53	-0.24	0.23	0.39	0.05	0.42	0.03	0.37	0.06
非纤维性碳水化合物 NFC	0.42	0.03	0.38	0.05	0.36	0.07	0.67	<0.01	0.01	0.95	-0.38	0.05	0.45	0.02	0.58	<0.01	0.56	<0.01

半纤维素 Hemicellulose	-0.52	<0.01	-0.48	0.01	-0.48	0.01	-0.50	<0.01	0.16	0.44	0.45	0.02	-0.50	<0.01	-0.64	<0.01	-0.63	<0.01
纤维素 Cellulose	-0.59	<0.01	-0.54	<0.01	-0.54	<0.01	-0.63	<0.01	0.13	0.53	0.50	<0.01	-0.38	0.05	-0.60	<0.01	-0.63	<0.01
CNCPS 碳水化合物组分 CNCPS carbohydrate composition/（%/CHO）																		
快速降解碳水化合物 CA	0.42	0.03	0.37	0.05	0.36	0.07	0.65	<0.01	0.002	0.99	-0.38	0.05	0.44	0.02	0.58	<0.01	0.57	<0.01
中速降解碳水化合物 CB_1	0.21	0.30	0.15	0.44	0.14	0.47	0.61	<0.01	-0.05	0.79	-0.42	0.03	0.44	0.02	0.56	<0.01	0.54	<0.01
慢速降解碳水化合物 CB_2	-0.35	0.08	-0.31	0.12	-0.29	0.15	-0.69	<0.01	-0.08	0.71	0.33	0.10	-0.41	0.03	-0.54	<0.01	-0.54	<0.01
不可利用细胞壁成分 CC	-0.43	0.03	-0.39	0.05	-0.38	0.05	-0.59	<0.01	0.04	0.85	0.38	0.05	-0.41	0.03	-0.53	<0.01	-0.51	<0.01
NDF 瘤胃降解参数 Ruminal degradation parameters of NDF																		

NDF_a/%	0.37	0.06	0.32	0.10	0.32	0.11	0.62	<0.01	-0.01	0.96	-0.40	0.04	0.47	0.01	0.60	<0.01	0.59	<0.01
NDF_b/%	-0.29	0.14	-0.25	0.21	-0.23	0.25	-0.65	<0.01	-0.03	0.87	0.35	0.07	-0.28	0.16	-0.39	0.05	-0.39	0.04
NDF_d/%	0.22	0.27	0.20	0.31	0.22	0.27	0.13	0.53	-0.07	0.73	-0.17	0.39	0.43	0.02	0.50	0.01	0.46	0.02
NDF_c/(%/h)	0.35	0.08	0.36	0.07	0.30	0.13	0.55	<0.01	0.30	0.12	0.00	0.99	-0.06	0.78	0.07	0.73	0.11	0.57
NDF_{ED}/%	0.42	0.03	0.40	0.04	0.36	0.06	0.64	<0.01	0.16	0.43	-0.22	0.27	0.27	0.18	0.42	0.03	0.43	0.03

r：相关系数；*P*：*P* 值。

r: correlation coefficient; *P*: *P*-value.

2.5　不同热处理豆渣的碳水化合物分子结构与其营养价值和NDF瘤胃降解特性之间的回归关系

由表6可知，A_STCHO/A_CHO以及总碳水化合物中的H_1155/H_1046、H_1109/H_1046是最佳预测因子，可以有效地估测碳水化合物（R^2=0.38，P<0.01）、淀粉（R^2=0.55，P<0.01）、NFC（R^2=0.63，P<0.01）、NDF（R^2=0.60，P<0.01）、ADF（R^2=0.63，P<0.01）、ADL（R^2=0.49，P<0.01）、半纤维素（R^2=0.54，P<0.01）、纤维素（R^2=0.64，P<0.01）的含量，和CNCPS碳水化合物组分中CA（R^2=0.61，P<0.01）、CB_1（R^2=0.55，P<0.01）、CB_2（R^2=0.63，P<0.01）、CC（R^2=0.50，P<0.01）的组分含量，以及NDF瘤胃降解参数中NDF_a（R^2=0.60，P<0.01）、NDF_b（R^2=0.42，P<0.01）、NDF_c（R^2=0.30，P<0.01）、NDF_d（R^2=0.23，P<0.01）、NDF_{ED}（R^2=0.41，P<0.01）的含量。

表 6　不同热处理豆渣的碳水化合物分子结构与其营养价值和 NDF 瘤胃降解特性之间的回归关系

Table 6　Regression relationship between molecular structure of carbohydrates, nutritional value and ruminal degradation characteristics of NDF in different heat treated okara

预测变量 Predicted variables (*Y*)	回归变量 Regression variable （*x*）	回归方程 Prediction equations（$Y=a+b_1x_1+b_2x_2+......+b_nx_n$）	决定系数 R^2	残差 RSD	*P* 值 *P*-value
碳水化合物成分 Carbohydrates content/% DM					
淀粉 Starch	A_STCHO/A_CHO、H_1155/H_1046	*Y*=-0.10+0.27 A_STCHO/A_CHO+0.04 H_1155/H_1046	0.55	<0.01	<0.01
中性洗涤纤维 NDF	A_STCHO/A_CHO、H_1109/H_1046	*Y*=113.57-141.34 A_STCHO/A_CHO-24.15 H_1109/H_1046	0.60	3.18	<0.01
酸性洗涤纤维 ADF	A_STCHO/A_CHO、H_1109/H_1046	*Y*=74.44-98.87 A_STCHO/A_CHO-16.08 H_1109/H_1046	0.63	1.34	<0.01
酸性洗涤木质素 ADL	A_STCHO/A_CHO、H_1155/H_1046	*Y*=10.22-19.30 A_STCHO/A_CHO-2.7 4H_1155/H_1046	0.49	0.08	<0.01
碳水化合物 CHO	A_STCHO/A_CHO	*Y*=60.51+22.88 A_STCHO A_CHO	0.38	0.08	<0.01
非纤维性碳水化合物 NFC	A_STCHO/A_CHO、H_1155/H_1046	*Y*=-17.05+109.29 A_STCHO/A_CHO+14.64 H_1155/H_1046	0.63	1.38	<0.01

半纤维素 Hemicellulose	A_STCHO/A_CHO、H_1155/H_1046	*Y*=36.27-36.16 A_STCHO/A_CHO-9.31 H_1155/H_1046	0.54	0.45	<0.01
纤维素 Cellulose	A_STCHO/A_CHO、H_1109/H_1046	*Y*=63.81-79.38 A_STCHO/A_CHO-13.45 H_1109/H_1046	0.64	0.87	<0.01
CNCPS 碳水化合物组分 CNCPS carbohydrate composition/（%/CHO）					
快速降解碳水化合物 CA	A_STCHO/A_CHO、H_1155/H_1046	*Y*=-19.33+145.26 A_STCHO/A_CHO+20.16 H_1155/H_1046	0.61	2.69	<0.01
中速降解碳水化合物 CB_1	A_STCHO/A_CHO、H_1155/H_1046	*Y*=-0.09+0.27 A_STCHO/A_CHO+0.04 H_1155/H_1046	0.55	<0.01	<0.01
慢速降解碳水化合物 CB_2	A_STCHO/A_CHO、H_1155/H_1046	*Y*=83.73-80.20 A_STCHO/A_CHO-9.06 H_1155/H_1046	0.63	0.66	<0.01
不可利用细胞壁成分 CC	A_STCHO/A_CHO、H_1155/H_1046	*Y*=36.30-68.90 A_STCHO/A_CHO-9.70 H_1155/H_1046	0.50	0.97	<0.01
NDF 瘤胃降解参数 Ruminal degradation parameters of NDF					
NDF_a/%	A_STCHO/A_CHO、H_1155/H_1046	*Y*=-25.18+66.31 A_STCHO/A_CHO+10.63 H_1155/H_1046	0.60	0.66	<0.01
NDF_b/%	A_STCHO/A_CHO	*Y*=116.46-72.84 A_STCHO/A_CHO	0.42	0.69	<0.01
NDF_d/%	H_1109/H_1046	*Y*=91.16+5.99 H_1155/H_1046	0.23	0.36	<0.01

NDF_c/(%/h)	A_STCHO/A_CHO	*Y*=0.17+7.75 A_STCHO/A_CHO	0.30	0.01	<0.01
NDF_{ED}/%	A_STCHO/A_CHO	*Y*=-1.67+108.44 A_STCHO/A_CHO	0.41	1.56	<0.01

3 讨 论

3.1 不同热处理对豆渣的碳水化合物成分和 CNCPS 碳水化合物组分的影响

Samadi等[23]在研究干热（120 ℃ 1 h）和湿热（120 ℃ 1 h）处理对油菜籽的影响时发现，干热法使NDF的含量减少，对ADF、ADL的含量影响不显著，与本试验的结果不一致，其原因可能是由于加热的程度或方式不同影响饲料中纤维含量的变化程度。在Fales[24]的研究中，温度升高使高羊茅牧草的NDF、ADF、半纤维素、纤维素含量增加。本试验的研究结果证明，温度的升高以及加热时间的延长会显著增加NDF、ADF、半纤维素、纤维素含量，结果与Fales[24]一致。加热后使豆渣碳水化合物成分中NFC的含量减少，这与Peng等[20]和Samadi等[23]的研究结果一致。从CNCPS碳水化合物组分来看，植物性饲料中碳水化合物是反刍动物的主要能量来源，CA、CB_1和CB_2含量较高，CC的含量较低，说明饲料在瘤胃中降解速度较快，营养价值较高[2-3]。本试验研究表明，加热处理增加了豆渣中CC的组分含量，降低了豆渣的营养价值。

3.2 不同热处理对豆渣 NDF 瘤胃动态降解参数的影响

豆渣中营养物质含量的变化导致 NDF 瘤胃有效动态降解参数的改变。CNCPS 体系能够反映出饲料在瘤胃中的消化利用等情况，随着加热程度的增加，豆渣中可溶性碳水化合物含量的降低导致 NDF_a 含量降低，CB_2 含量的升高导致 NDF_b 含量升高，同时加热使不可降解纤维的含量增加，这部分纤维在瘤胃内不被降解[19]。据文献报道[25]，饲料中 NDF_a 的含量减少、NDF_b 的含量增加以及不可降解部分的含量增加会使 NDF_{ED} 降低。研究表明，加热使 NDF 与粗蛋白质结合生成中性洗涤纤维不溶蛋白质(NDICP)，从而降低粗蛋白质瘤胃有效降解率[26]。本试验中加热后 NDF_{ED} 降低原因可能是：1）加热使可溶性纤维转化为不可溶性纤维；2）加热使中 NDF 与粗蛋白质结合生成 NDICP，从而也降低了 NDF_{ED}。加热导致 NDF_{ED} 降低的原因还有待进一步研究与探讨。

3.3 不同热处理对豆渣碳水化合物分子结构的影响

碳水化合物分子结构光谱主要研究结构性碳水化合物、纤维复合物和总碳水化合物，而且碳水化合物内部分子结构特点会影响饲料的 NDF_{ED}[27]。由于加热会使饲料的分子结构发生改变，因此本试验研究了不同热处理对豆渣的碳水化合物分子结构的影响，发现加热会使豆渣 A_TCHO、A_CELC 和 A_CHO 积减小，总碳水化合物中的 3 个峰高值降低。目前，没有关于热处理对饲料碳水化合物分子结构特点影响的研究。但是，Yu 等[28]得出了生物乙醇的制作过程中加热改变了原来谷物的碳水化合物的分子结构，而碳水化合物分子结构的变化会影响干酒糟及其可溶物（DDGS）的利用价值。因此，加热使豆渣碳水化合物分子结构发生改变也会影响其利用价值。

3.4　不同热处理豆渣的碳水化合物分子结构与其营养价值、NDF 瘤胃降解特性之间的相关关系

大量的文献证明了饲料的碳水化合物分子结构与其营养价值之间存在着一定的相关性[8,12,28-29]。Xin 等[29]在研究碳水化合物分子结构与其营养价值、瘤胃降解特性之间的相关关系中得出，A_CELC 与 NDF、ADF、ADL 之间存在显著负相关（r=-0.73～-0.97），A_CELC 与 NDF_c 之间存在显著负相关（r=-0.84），与 NDF_{ED} 之间存在显著正相关（r=0.84）。本试验中，A_CELC 与 NDF、ADF 之间存在显著负相关（r=-0.50～-0.52），A_CELC 与 NDF_c 之间不存在相关性，与 NDF_{ED} 之间存在正相关（r=0.40），与 Xin 等[29]的研究存在差异，原因可能是饲料的不同以及对饲料加工的方式不同导致饲料中碳水化合物分子结构的不同，使碳水化合物分子结构与其营养价值之间的相关性存在差异[30]。

3.5　不同热处理豆渣的碳水化合物分子结构与其营养价值、NDF 瘤胃降解特性之间的回归关系

Xin 等[8]研究表明，A_CELC/A_CHO 以及总碳水化合物中的峰高比能够较好地对玉米秸秆不同部位的常规营养成分和 NDF_{ED} 进行快速的分析和估测，回归方程拟合最好的是粗纤维=−195.227×R_CHO_1_3−129.344×R_CHO_2_3+183.411　（R^2=0.66，P<0.01）。本试验

得出，A_STCHO/A_CHO 以及总碳水化合物中峰高比可以有效地估测加热后豆渣的常规营养成分和 NDF 瘤胃有效降解率。其中，A_STCHO/A_CHO 以及总碳水化合物中峰高比能够较好地估测加热后豆渣的的常规营养成分，回归方程拟合最好的是纤维素=63.81-79.38 A_STCHO/A_CHO-13.45 H_1109/H_1046 （R^2=0.64，P<0.01）。而 NDF 瘤胃有效降解参数所在回归方程的 R^2 偏小，但 NDF 瘤胃有效降解参数仍与 A_STCHO/A_CHO 以及总碳水化合物中的峰高比存在相关关系。

4 结 论

① 不同热处理对豆渣的营养价值和 NDF_{ED} 均有影响。其中，100 ℃、2 h 组豆渣的营养价值最高，NDF_{ED} 最高。

② 不同热处理对豆渣的碳水化合物分子结构有影响。其中，100 ℃、2 h 组豆渣的 A_STCHO、A_CELC、A_CHO 最大，总碳水化合物中的 3 个峰高最高。

③ 不同热处理豆渣的碳水化合物分子结构与其营养价值、NDF 瘤胃降解特性之间存在相关关系，并根据相关关系构建出回归方程。其中，A_STCHO/A_CHO 以及总碳水化合物中的峰高比可以有效地估测不同热处理后豆渣的营养价值和 NDF 瘤胃降解参数的含量。

④ 初步证明，通过 FTIR 光谱技术得到的光谱信息可以作为热处理中一个敏感指标对豆渣的热损害程度进行简单、快速、无破坏性的分析。

参考文献：

[1] 祝义伟,龙勃,龙勇,等.豆渣中营养成分的检测及其含量声称[J].食品研究与开发,2017,38(8):117–120.

[2] 李岩,孟庆祥,陈万宝.应用 CNCPS 方法和体外产气法研究豆腐渣饲料的营养价值[J].中国畜牧兽医,2017,44(5):1355–1362.

[3] 张学燕,崔占鸿,孙璐,等.利用体外产气法及 CNCPS 体系评定豆渣、菜籽粕的营养价值[J].青海畜牧兽医杂志,2017,47(3):18–22.

[4] 张永根,薛世崇,李洋,等.固态发酵豆渣作生产反刍动物饲料工艺条件的研究[J].东北农业大学学报,2016,47(5):76–82.

[5] 潘树国.废豆渣生产生物蛋白饲料可行性研究[J].现代畜牧科技,2017(10):8–9.

[6] 张文佳.产朊假丝酵母和白地霉混合固态发酵豆渣生产反刍动物饲料的研究[D].硕士学位论文.哈尔滨:东北农业大学,2015.

[7] GONZÁLEZ-VEGA J C,KIM B G,HTOO J K,等.热处理豆粕饲喂生长猪的氨基酸消化率[J].中国饲料,2015(24):32–37.

[8] XIN H S,DING X,ZHANG L Y,et al.Investigation of the spectroscopic information on functional groups related to carbohydrates in different morphological fractions of corn stover and their relationship to nutrient supply and biodegradation characteristics[J].Journal of Agricultural and Food Chemistry,2017,65(20):4035–4043.

[9] LIU N,YU P Q.Molecular clustering,interrelationships and carbohydrate conformation in hull and seeds among barley cultivars[J].Journal of Cereal Science,2011,53(3):379–383.

[10] GHOLIZADEH H,NASERIAN A A,XIN H S,et al.Detecting carbohydrate molecular structural makeup in different types of cereal grains and different cultivars within each type of grain grown in semi-arid area using FTIR spectroscopy with uni- and multi-variate molecular spectral analyses[J].Animal Feed Science and Technology,2014,194:136–144.

[11] PRATES L L,REFAT B,LEI Y G,et al.Relationship of carbohydrates and lignin molecular structure spectral profiles to nutrient profile in newly developed oats cultivars and barley grain[J].Spectrochimica Acta Part A:Molecular and Biomolecular Spectroscopy,2018,188:495–506.

[12] JI C Y,ZHANG X W,YAN X G,et al.Bio-functions and molecular carbohydrate structure association study in forage with different source origins revealed using non-destructive

vibrational molecular spectroscopy techniques[J].Spectrochimica Acta Part A:Molecular and Biomolecular Spectroscopy,2017,183:260–266.

[13] 张平安,张建威,宋连军,等.豆渣微波热风联合干燥特性研究[J].南方农业学报,2011,42(5):528–530.

[14] 李波,张延生,李瑞峰,等.不同干燥方法对豆腐渣功能性质的影响[J].河南科技学院学报（自然科学版）,2008,36(3):64–66.

[15] NRC.Nutrient requirements of dairy cattle[M].7th ed.Washington,D.C.:National Academy Press,2001.

[16] 杨胜.饲料分析及饲料质量检测技术[M].北京:北京农业大学出版社,1999.

[17] 张旭,蒋桂韬,王向荣,等.酶法测定谷物副产品中淀粉含量[J].广东饲料,2013,22(10):33–35.

[18] VAN SOEST P J,ROBERTSON J B,LEWIS B A.Methods for dietary fiber,neutral detergent fiber,and nonstarch polysaccharides in relation to animal nutrition[J].Journal of Dairy Science,1991,74(10):3583−3597.

[19] SNIFFEN C J,O’CONNOR J D,VAN SOEST P J,et al.A net carbohydrate and protein system for evaluating cattle diets: Ⅱ .Carbohydrate and protein availability[J].Journal of Animal Science,1992,70(11):3562−3577.

[20] PENG Q H,KHAN N A,WANG Z S,et al.Moist and dry heating-induced changes in protein molecular structure,protein subfractions,and nutrient profiles in camelina seeds[J].Journal of Dairy Science,2014,97(1):446–457.

[21] ØRSKOV E R,MCDONALD I.The estimation of protein degradability in the rumen from incubation measurements weighted according to rate of passage[J].The Journal of Agricultural Science,1979,92(2):499–503.

[22] 高红,郝小燕,张广宁,等.应用体外产气法和尼龙袋法评价几种粮食加工副产物的营养价值[J].中国饲料,2017(7):14–19.

[23] SAMADI,THEODORIDOU K,YU P Q.Detect the sensitivity and response of protein molecular structure of whole canola seed (yellow and brown) to different heat processing methods and relation to protein utilization and availability using ATR-FT/IR molecular spectroscopy with chemometrics[J].Spectrochimica Acta Part A:Molecular and Biomolecular Spectroscopy,2013,105:304–313.

[24] FALES S L.温度对高羊茅的纤维含量、组成及体外消化动力学的影响[J].草原与业,1988(3):46–50.

[25] NUEZ-ORTÍN W G,YU P.Estimation of ruminal and intestinal digestion profiles,hourly effective degradation ratio and potential N to energy synchronization of co-products from bioethanol processing[J].Journal of the Science of Food and Agriculture,2010,90(12):2058–2067.

[26] MCKINNON J J,OLUBOBOKUN J A,MUSTAFA A,et al.Influence of dry heat treatment of canola meal on site and extent of nutrient disappearance in ruminants[J].Animal Feed Science and Technology,1995,56(3/4):243–252.

[27] XIN H S,YU P Q.Using ATR–FT/IR to detect carbohydrate-related molecular structure features of carinata meal and their *in situ* residues of ruminal fermentation in comparison with canola meal[J].Spectrochimica Acta Part A:Molecular and Biomolecular Spectroscopy,2013,114:599–606.

[28] YU P Q,DAMIRAN D,AZARFAR A,et al.Detecting molecular features of spectra mainly associated with structural and non-structural carbohydrates in co-products from bioEthanol production using DRIFT with uni- and multivariate molecular spectral

analyses[J].International Journal of Molecular Sciences,2011,12(3):1921–1935.

[29] XIN H S,FALK K C,YU P Q.Studies on *Brassica carinata* seed.2.Carbohydrate molecular structure in relation to carbohydrate chemical profile,energy values,and biodegradation characteristics[J].Journal of Agricultural and Food Chemistry,2013,61(42):10127–10134.

[30] 李欣新.双低菜粕和豆粕分子结构与营养特性和奶牛生产性能的关系[D].博士学位论文.哈尔滨:东北农业大学,2016.

Study on Correlation of Molecular Structure of Carbohydrate with Its Nutritional Value and Ruminal Degradation Characteristics in Different Heat Treated Okara

LI Xin XU Hongjian HUO Pengju WANG Yujie LIU Xin YAO Enyue SUN Manji*

ZHANG Yonggen*

(*College of Animal Science and Technology, Northeast Agricultural University*, *Harbin* 150030,*China*)

Abstract: The purpose of this experiment is to explore the effect of different heat treated on the molecular structure of carbohydrates in okara and its relationship with nutritional value and ruminal degradation characteristics. The nutrient value of different heat treated okara was evaluated by conventional chemical analysis combined with Cornell net carbohydrate-protein system (CNCPS) and nylon bag technology, changes of the molecular structure of carbohydrates in okara was analyzed by Fourier transform infrared spectroscopy (FTIR), then explore the correlation between the molecular structure of carbohydrates and nutritional value and ruminal degradation characteristics. The results showed as follows: 1) heat treatment reduced the nutritional value of okara and the rumen degradability of neutral detergent fibers (NDF). 2) Different heat treatment had significants effect on the peak area of structural carbohydrates (STCHO), fiber composites (CELC), total carbohydrates (CHO) and the corresponding peak heights in the three peak areas in the molecular structure of carbohydrates in okara (P<0.05). 3) The peak area ratio of STCHO to CHO and the peak to height ratio of total carbohydrates can effectively estimate the nutritional value of different heat treated okara and the content of NDF rumen degradation parameters. In summary, different heat treatment have effects on the molecular structure, nutritional value and ruminal degradability of NDF in okara, and there is a correlation between the molecular structure of carbohydrates in okara and their nutritional value along with

*Corresponding authors: SUN Manji professor, E-mail: 302564115@qq.com; ZHANG Yonggen, professor, E-mail: zhangyonggen@sina.com （责任编辑 武海龙）

ruminal degradability in NDF. It is proved that the spectral information of okara obtained by FTIR spectroscopy can directly reflect the degree of thermal damage.

Key words: heat treated; okara; FTIR; carbohydrate molecular structure; correlation